نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۴، شماره ۲، خرداد – تیر ۱۳۹۹، ص. ۳۶۴-۳۴۹

Journal of Water and Soil
Vol. 34, No. 2, May-June 2020, p. 349-364

مقاله علمی-پژوهشی

شبیه‌سازی مساحت خیس شده پیاز رطوبتی در سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی

بختیار کریمی[1*]- نظیر کریمی[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰

چکیده

از پارامترهای مهم در طراحی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی در نظر گرفتن الگوی سطح خیس شده بالای و پایین قطره‌چکان می‌باشد. در این تحقیق از یک مدل فیزیکی شفاف (مکعب مستطیل) از جنس پلی‌کربنات به ابعاد ۰/۵×۱×۳ استفاده شد و آزمایشات بر روی سه نوع بافت خاک (سبک، متوسط و سنگین)، با سه نوع دبی قطره چکان (۲، ۴ و ۶ لیتر در ساعت)، در سه عمق مختلف نصب قطره‌چکان (صفر، ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری) به انجام رسید. همچنین این آزمایشات برای دو نوع سیستم آبیاری پیوسته و پالسی صورت گرفت که در آبیاری پالسی، زمان قطع و وصل پالس‌ها مقادیر ۳۰-۳۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۲۰ دقیقه در نظر گرفته شد که عدد اول بیانگر زمان آبیاری و عدد دوم زمان استراحت سیستم در هر چرخه خواهد بود. سپس با استفاده از آنالیز رگرسیون غیرخطی و در نظر گرفتن متغیرهای زمان آبیاری، دبی قطره‌چکان، هدایت هیدرولیکی اشباع، درصد شن و سیلت و رس، چگالی ظاهری خاک، رطوبت اولیه خاک، عمق نصب قطره‌چکان و همچنین نسبت پالس (نسبت زمان آبیاری در هر چرخه به زمان کل یک چرخه) روابطی برای تخمین سطح خیس شده جبهه رطوبتی ارائه گردید. نتایج مقایسه بین مقادیر اندازه گیری و شبیه‌سازی شده نشان داد که مدل رگرسیون غیر خطی با دقت بالایی سطح خیس شده جبهه رطوبتی را برآورد می‌کند. در نظر گرفتن این روابط در طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی می‌تواند باعث بهبود عملکرد این سیستم‌ها شود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای، پیاز رطوبتی، شبیه‌سازی، مساحت خیس شده، مدیریت آبیاری

مقدمه

در میان روش‌های آبیاری، آبیاری قطره‌ای به علت راندمان مصرف آب بالا و عملکرد بالای محصول دارای مقبولیت بیشتری در مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشند. طراحی و مدیریت مناسب سیستم‌های آبیاری قطره‌ای به شدت نیازمند فهم درست از الگوی توزیع رطوبت اطراف قطره‌چکان می‌باشد (۴، ۵، ۱۰، ۱۴، ۱۸، ۱۹، ۲۳، ۲۴ و ۲۹). توزیع رطوبت در خاک برای سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی (DI[2]) و سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI[3]) به پارامترهایی از قبیل دبی خروجی قطره‌چکان، فاصله قطره‌چکان‌ها، ساختمان خاک، محل قطره‌چکان (سطحی یا زیر سطحی)، روش کاربرد آب (پیوسته یا پالسی) و خصوصیات فیزیکی خاک دارد (۱). آبیاری قطره‌ای پالسی یکی از روش‌های آبیاری می‌باشد که شامل مجموعه‌ای از چرخه‌ها می‌باشد که هر کدام از چرخه‌ها از یک فاز آبیاری و یک فاز استراحت تشکیل شده است (۱۷ و ۲۷). آبیاری قطره‌ای پالسی با مدیریت خوب، پتانسیل زیادی در بهبود توزیع یکنواختی آب در خاک را به همراه دارد. در آبیاری قطره‌ای پالسی به جای اینکه از ابتدا تا انتهای آبیاری جریان پیوسته‌ای از آب در داخل خاک برقرار باشد، جریان آب به دفعات متناوب قطع و وصل می‌شود. هر دوره زمانی دارای یک زمان وصل جریان (مدت زمانی که آب در خاک جریان دارد) و زمان قطع (مدت زمان بین پایان جریان ارسالی و شروع دوره زمانی جریان بعدی) می‌باشد که می‌تواند به صورت ثابت و یا متغیر باشد؛ بنابراین دوره زمانی هر جریان آب، برابر با مجموع زمان قطع و وصل می‌باشد (۲۶). نتایج برخی از مطالعات انجام شده بر روی سیستم آبیاری پالسی نشان می‌دهد که توزیع رطوبت در سیستم آبیاری پالسی با سیستم آبیاری پیوسته دارای مقادیر متفاوتی می‌باشد (۲۰ و ۲۶). با طراحی و مدیریت مناسب در سیستم آبیاری پالسی می‌توان انتظار یکنواختی توزیع رطوبت و راندمان بالا را با بکارگیری حجم محدود آب در ناحیه توسعه ریشه داشت (۲۶). مطالعات زیادی در زمینه تخمین ابعاد پیاز رطوبتی در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی به انجام رسیده است (۲، ۳، ۶، ۷، ۸، ۲۸، ۳۱، ۳۲ و ۳۳). سوبایا (۳۴) با ارائه یک مقاله مروری رایجترین

۱ و ۲- به‌ترتیب استادیار و دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: bakhtiar.karimi@gmail.com)
DOI: 10.22067/jsw.v34i2.82228
2- Surface drip irrigation
3- Subsurface drip irrigation

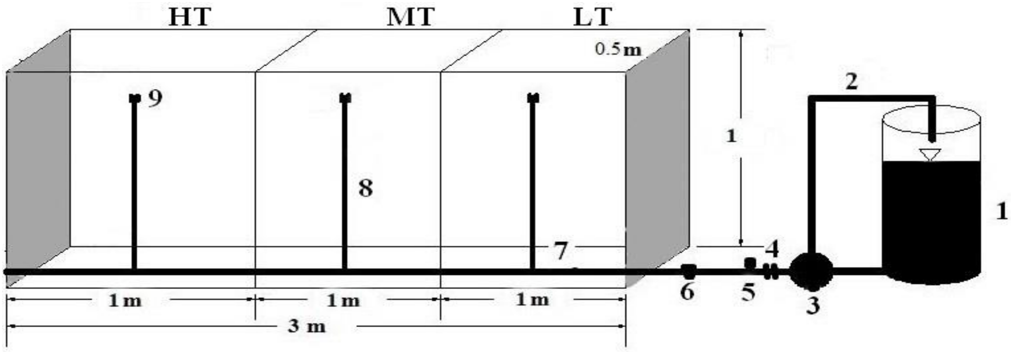
مدل‌های ارائه شده در زمینه مدل‌سازی الگوی توزیع رطوبت را با جزئیات کامل ارائه نمودند. با توجه به اینکه بیشتر مطالعات ذکر شده در بالا برای مدل‌سازی ابعاد پیاز رطوبتی (توزیع افقی و عمودی) در آبیاری پیوسته بوده و مطالعات اندکی در زمینه آبیاری پالسی صورت گرفته است. همچنین یکی از استراتژی‌های مهم برای بهبود وضعیت طراحی در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای در نظر گرفتن مساحت خیس شده بالا و پایین قطره‌چکان می‌باشد (۱۱ و ۱۲) که در تحقیقات قبلی کمتر به آن توجه شده است. محمد بیگی و همکاران(۲۶) بااستفاده از آنالیز ابعادی و قضیه π باکینگهام و با در نظر گرفتن سه متغیر (هدایت هیدرولیکی اشباع، دبی خروجی از قطره‌چکان و زمان آبیاری) روابطی را برای برآورد ابعاد پیاز رطوبتی (توزیع افقی و عمودی) در سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی پالسی و پیوسته پیشنهاد دادند. آنها نشان دادند این روابط دارای کارایی قابل قبولی در این زمینه می‌باشند. کریمی و علی نظری (۱۵) و همچنین کریمی و کریمی (۱۶) به ترتیب شکل کامل پیاز رطوبتی در سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی و سرعت پیشرویی جبهه رطوبتی خاک در سیستم آبیاری پالسی را با استفاده از رگرسیون غیر خطی مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج حاصل از این دو تحقیق نشان داد که تکنیک رگرسیون توانایی قابل توجهی در تخمین پارامترهای مذکور دارد.

با توجه به جمیع موارد فوق، قابل ذکر است که مطالعات اندکی در زمینه سیستم آبیاری پالسی صورت گرفته و بیشتر مطالعات صورت گرفته در زمینه سیستم آبیاری پیوسته و برای مدل‌سازی ابعاد پیاز رطوبتی می‌باشد. همچنین تحقیقات صورت گرفته در زمینه آبیاری قطره‌ای زیر سطحی نیز چندان زیاد نمی‌باشد. از آنجائیکه در کنار ابعاد پیاز رطوبتی (توزیع در جهت افقی و عمودی)، مساحت خیس شده پیاز رطوبتی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پس هدف اصلی این تحقیق مدل‌سازی مساحت خیس شده پیاز رطوبتی در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی با کاربرد پیوسته و پالسی می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه بیشتر محققین به علت سهولت استفاده از مدلهای تجربی (بخصوص مدل رگرسیون غیر خطی)، این تکنینک را برای مدل‌سازی استفاده نموده‌اند (۱ و ۲۵). پس در این تحقیق جهت مدل‌سازی مساحت خیس شده پیاز رطوبتی از مدل رگرسیون غیر خطی استفاده گردید.

مواد و روش‌ها

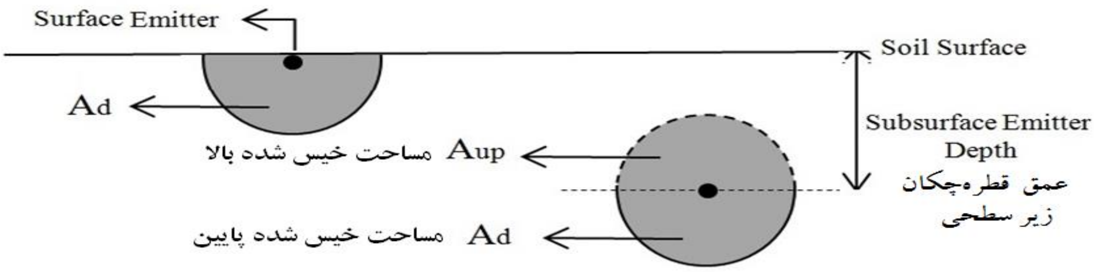
این آزمایشات در فاصله زمانی ۱۵ فروردین ۱۳۹۵ تا ۲۰ مهر ۱۳۹۶ به طول انجامید. به منظور انجام آزمایشات مدلی از مکعب مستطیل با ابعاد (۰/۵×۱×۳) متر در دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان ساخته شد. به منظور مشاهده و اندازه‌گیری جبهه پیشروی رطوبت، صفحه جلویی مدل از جنس پلی‌کربنات تخت و سایر قسمت‌های آن از جنس فلز ساخته شد. برای راحتی انجام آزمایش، این مدل به سه بخش مساوی تقسیم گردید و همزمان سه آزمایش صورت می‌گرفت. همچنین، به منظور محاسبه جبهه پیشروی رطوبت در جهات مختلف، قسمت جلویی مدل به وسیله متر پارچه‌ای و به صورت کاملا تراز در دو جهت افقی و عمودی درجه‌بندی گردید. همچنین به منظور جلوگیری از جریانات ترجیحی در حین آزمایش، با استفاده از مالیدن چسپ بر روی سطح پلی‌کربنات تخت و سپس پاشیدن شن‌های زبر بر روی آن یک سطح نسبتاً زبر ایجاد گردید به گونه‌ای که شفافیت صفحه جلویی مدل را حفظ کرده بود (۹). کلیه لوازم و تجهیزات یک سیستم آبیاری قطره‌ای متناسب با شرایط واقعی مزرعه در مدل فیزیکی شبیه‌سازی گردید. بطوریکه آب به وسیله پمپ و از طریق لوله‌های پلی‌اتیلن (لوله اصلی با قطر ۳۲ میلی‌متر ولوله نیمه اصلی و لاترال به ترتیب با قطرهای ۲۰ و ۱۶ میلی‌متر) از یک مخزن ۲۰۰ لیتری به قطره‌چکان‌ها منتقل گردید. همچنین در مسیر انتقال آب از شیر فلکه (به منظور هدایت جریان)، فیلتر توری (به منظور جلوگیری از گرفتگی قطره‌چکان‌ها و عدم یکنواختی توزیع)، فشارسنج (به منظور اعمال یک فشار ثابت در کلیه آزمایشات) و شیر قطع و وصل جریان (به منظور کنترل جریان به داخل هر محفظه) استفاده گردید. کلیه آزمایشات در فشار ثابت ۲ بار به انجام رسید و با توجه به اینکه مقدار دبی خروجی خیلی کم بود به منظور کاهش فشار وارده به سیستم یک مجموعه بای‌پس نیز طراحی گردید (۱۲ و ۱۳). در شکل ۱ نمای کاملی از موقعیت قرارگیری کلیه تجهیزات مورد استفاده در این تحقیق آورده شده است. در کل تعداد ۱۰۸ آزمایش در این تحقیق به انجام رسیده است که بر روی سه نوع بافت خاک (سبک، متوسط و سنگین) که مشخصات فیزیکی آن‌ها در جدول ۱ آمده است. در این تحقیق هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از نرم‌افزار Rosetta تخمین زده شد (۳۰). پر کردن هر محفظه از خاک خشک شده مطابق با وزن مخصوص ظاهری هر خاک صورت گرفت و سپس به منظور پایداری خاک و توزیع یکنواخت رطوبت اولیه، خاک داخل محفظه‌ها به مدت ۲۴ الی ۴۸ ساعت در قرار داده می‌شد (۱). در این آزمایشات تغییرات مقادیر اولیه رطوبت در آزمایش‌های مختلف کم می باشد و این شرایط مطابق با شرایطی است که بیشتر مدلهای تجربی ارائه شده است (۲۲). این آزمایشات با سه نوع دبی قطره‌چکان (۲، ۴ و ۶ لیتر در ساعت)، در سه عمق مختلف نصب قطره‌چکان (صفر، ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری) به انجام رسید. با توجه به رایج بودن نوع قطره‌چکان در بازار منطقه، از قطره‌چکان نتافیم استفاده گردید که مشخصات فنی آن در جدول ۲ آمده است. همچنین این آزمایشات برای دو نوع سیستم آبیاری پیوسته و پالسی صورت گرفت که در آبیاری پالسی، زمان قطع و وصل پالس‌ها (۳۰-۳۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۲۰ دقیقه) که عدد اول زمان آبیاری و عدد دوم زمان استراحت سیستم در هر چرخه خواهد بود. با توجه به اینکه آزمایشات بر روی یک نیمکره

به انجام رسیده است برای تعمیم آن به شرایط واقعی بایستی مقدار دبی در عدد ۲ ضرب شود (۲۱). در این پژوهش به منظور تعیین مساحت خیس شده بالا و پایین قطره‌چکان، در زمان‌های مختلف تا انتهای آبیاری (مدت زمان ۴ ساعت) جبهه پیشروی آب بر روی صفحه پلی‌کربنات تخت با استفاده از ماژیک ترسیم گردید. در پایان هر آزمایش با تهیه عکسی از صفحه جلویی مدل و به کمک نرم‌افزار گرافر مقادیر مساحت خیس شده بالا و پایین محاسبه گردید. از جمله پارامترهای مهم مساحت خیس شده عبارتند از مساحت خیس شده پایین قطره‌چکان (A_d) برای سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی و همچنین مساحت خیس شده بالای قطره‌چکان (A_{up}) برای سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی. با توجه به شکل ۲ مساحت خیس شده بالا و پایین قطره‌چکان برای سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی مشخص است.



شکل ۱- توصیف شماتیک از وسیله آزمایشگاهی ۱- منبع ۲- بای‌پس ۳- پمپ ٤- شرفلکه ٥- فشارسنج ٦- فیلتر ۷- لوله اصلی ۸- لوله نیمه اصلی ۹- شیر قطع و وصل

Figure 1- Schematic descriptions of the experimental device. 1-Reservoir 2- By-pass Assembly 3- Pump 4- Valve 5- Gage 6- Filter 7- Main Pipe 8- Sub-main Pipe 9- Off-on Valve



شکل ۲- شکل شماتیک توزیع مساحت خیس شده در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی

Figure 2- Schematic picture of wetted area distribution in surface and subsurface drip irrigation

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی نمونه‌های خاک

Table 1- Physical properties of soil samples

نام نمونه Samples name	بافت خاک Soil texture	شن ٪ Sand%	سیلت ٪ Silt%	رس Clay%	چگالی ظاهری Bulk density (gr/cm^3)	هدایت هیدرولیکی Ks (cm/h)
HT*	Clay	26	26	48	1.30	0.85
MT**	Sandy-clay-loam	50	18	32	1.36	0.92
LT#	Loam-sandy	82	6	12	1.53	3.95

*Heavy texture (بافت سنگین)

**Medium texture (بافت متوسط)

#Light texture (بافت سبک)

جدول ۲- خصوصیات فنی قطره‌چکان‌های مورد استفاده

Table 2- Technical properties of used emitters

	دبی ۲ لیتر در ساعت Emitter discharge (q=2 Lit/hr)	دبی ٤ لیتر در ساعت Emitter discharge (q=4 Lit/hr)
ضریب یکنواختی توزیع (Distribution uniformity)	98	99
درصد ضریب تغییرات ساخت قطره چکان (Variety coefficients)	0.032	0.017

معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی عملکرد مدل‌های ارائه شـده در مقایسـه بـا مقـادیر مشاهداتی مساحت خیس دشه از پارامترهای آماری ضـریب تبـین در سطح پنج درصد (R^2)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه میانگین مربعـات خطـا (RMSE)، شـاخص پراکنـدگی (SI) و شـاخص نـاش ساتکلیف (NSE) به‌ترتیب از روابط ۱ تا ۵ استفاده شد:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})^2}}\right]^2 \quad (۱)$$

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}|O_i - P_i| \quad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{N}} \quad (۳)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{O}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{N}}}{\bar{O}} \quad (۴)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \quad (۵)$$

که در آن‌ها O_i و $\bar{O}$ بـه ترتیـب مقـادیر مشـاهداتی و میـانگین مقادیر مشاهداتی، P_i مقادیر محاسباتی، $\bar{P}$ میانگین مقادیر محاسباتی و N تعداد داده‌ها است.

مدل‌های پیشنهادی

یکی از روش‌هایی که در شبیه‌سازی حرکت جبهـه پیشـروی آب مطرح است و اخیراً مطالعاتی نیز در این خصوص صورت گرفته است، روش تجربی رگرسیون غیرخطی است (۱ و ۲۵). مزیت این روش بـه این دلیل است که متغیرهای ورودی بیشتری برای تخمین در نظر می گیرد که با داشتن این پارامترها مدل می‌تواند شناخت بهتری از محیط پیچیده خاک داشته باشد. عوامل بسیاری بر روی سـطح خـیس شـده پیاز رطوبتی خاک مؤثر هستند. بخشی از ایـن عوامـل بـا مشخصـات فیزیکی خاک مرتبط هستند از جمله: هدایت هیدرولیکی اشباع، مقدار رطوبت اولیه، چگالی ظاهری و درصدهای شن، سیلت و رس می‌باشد. در حالیکه بخشی دیگر از این عوامل بـا پارامترهـای سیسـتم آبیـاری قطره‌ای وابسته هستند مانند: دبی قطـره‌چکـان، زمـان سـپری شـده، موقعیت قطره‌چکان (سطحی یـا زیرسـطحی) و روش کـاربرد آبیـاری (پیوسته یا پالسی). با توجه بـه عوامـل تاثیرگـذار ذکـر شـده در ایـن تحقیق یک مدل تجربی به منظور تخمین سطح خیس شـده و بـا در نظر گرفتن پارامترهای دبی قطره‌چکان، هـدایت هیـدرولیکی اشـباع، زمان کاربرد آبیـاری، وزن مخصـوص ظـاهری خـاک، عمـق نصـب قطره‌چکان، رطوبت اولیه خاک، عمق نصب قطره‌چکان و درصد شـن و سیلت و رس برای سیستم‌های آبیاری پیوسته پیشـنهاد گردیـد و در سیستم پیشنهادی آبیاری پالسی عـلاوه بـر پارامترهـای فـوق نسـبت پالس آبیاری (نسبت زمان آبیاری در یک چرخه به زمـان کـل در هـر چرخه) نیز در نظر گرفته شد که فرم کلی معادلـه پیشـنهادی در زیـر آورده شده است. در این پژوهش تعداد داده‌های مورد اسـتفاده جهـت مدل‌سازی مساحت خیس شده پیاز رطوبتی در سیستم‌هـای قطـره‌ای سطحی پیوسته ۱۰۸ و تعداد داده‌های مورد استفاده جهت مدل‌سـازی مساحت پایین و بالای قطره چکـان در سیسـتم زیرسـطحی پیوسـته ۲۲۰ می باشد که شکل کلی این مدلهای پیشنهادی در معادلات ۶، ۷ و ۸ آورده شده است و به شرح زیر می‌باشد.

$$A_d = a t^{a_1} q^{a_2} {k_s}^{a_3} S^{a_4} Si^{a_5} C^{a_6} {\rho_b}^{a_7} {\theta_i}^{a_8} \quad (۶)$$

$$A_d = b t^{b_1} q^{b_2} {k_s}^{b_3} S^{b_4} Si^{b_5} C^{b_6} {\rho_b}^{b_7} {\theta_i}^{b_8} Z^{b_9} \quad (۷)$$

$$A_{up} = c t^{c_1} q^{c_2} {k_s}^{c_3} S^{c_4} Si^{c_5} C^{c_6} {\rho_b}^{c_7} {\theta_i}^{c_8} Z^{c_9} \quad (۸)$$

و تعداد داده‌های مورد استفاده جهت مدل‌سـازی مسـاحت خـیس شده پیاز رطوبتی برای سیستم‌های قطره‌ای سطحی پالسی مقدار ۵۲۹ و برای مدل‌سازی مساحت پایین و بالای سیستم زیرسطحی پالسی به ترتیب مقدار ۹۳۲ و ۱۴۷۶ می باشد که شـکل کلـی ایـن مـدل‌هـای پیشنهادی در معادلات ۹، ۱۰ و ۱۱ آورده شده است و بـه شـرح زیـر است.

$$A_d = d t^{d_1} q^{d_2} {k_s}^{d_3} S^{d_4} Si^{d_5} C^{d_6} {\rho_b}^{d_7} {\theta_i}^{d_8} \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{d_9} \quad (۹)$$

$$A_d = e t^{e_1} q^{e_2} {k_s}^{e_3} S^{e_4} Si^{e_5} C^{e_6} {\rho_b}^{e_7} {\theta_i}^{e_8} Z^{e_9} \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{e_{10}} \quad (۱۰)$$

$$A_{up} = f t^{f_1} q^{f_2} {k_s}^{f_3} S^{f_4} Si^{f_5} C^{f_6} {\rho_b}^{f_7} {\theta_i}^{f_8} Z^{f_9} \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{f_{10}} \quad (۱۱)$$

در مدلهای ارائه شده معادله ۵ و ۸ به ترتیب مربوط به سیستم آبیاری قطره ای پیوسته و پالسی می باشد و معادلات ۶ و ۷ به ترتیب مربوط به مساحت پایین و بالای قطره چکان در سیستم آبیاری قطره ای زیرسطحی پیوسته می باشد و همچنین معادلات ۹ و ۱۰ به ترتیب مربوط به مساحت پایین و بالای قطره چکان در سیستم آبیاری زیرسطحی پالسی می باشد. لازم به ذکر است در این روابط مساحت خیس شده پایین قطره‌چکان (A_d)، مساحت خیس شده بالای قطره‌چکان (A_{up}) می باشد. همچنین زمان آبیاری (t) بر حسب دقیقه، دبی قطره‌چکان (Q) بر حسب لیتر در ساعت، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s) بر حسب سانتی‌متر در ساعت، درصدهای شن و سیلت و رس (Si ،S و C) بر حسب درصد، چگالی ظاهری خاک (ρ_b) بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، رطوبت اولیه خاک (θ_0) بر حسب درصد جرمی، عمق نصب قطره‌چکان در سیستم قطره‌ای زیرسطحی (Z) بر حسب سانتی‌متر و نسبت پالس آبیاری یا نسبت زمان آبیاری در یک چرخه بر زمان کل چرخه در سیستم قطره‌ای پالسی (T_{on}/T_{tot}) می‌باشد. همچنین ضرایب تجربی تمامی معادلات ذکر شده با استفاده از نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۰ و به کمک Tool box solver بهینه‌سازی و محاسبه گردید. همچنین به منظور ارزیابی عملکرد و دقت این مدل‌ها، مقایسات آماری بین مدلهای پیشنهاد شده با مدل کریمی و همکاران (۱۲) ارائه شده صورت گرفت. کریمی و همکاران (۱۲) با استفاده از قضیه π باکینگهام و با استفاده از آنالیز ابعادی و با در نظر گرفتن سه متغیر (هدایت هیدرولیکی اشباع، دبی خروجی از قطره‌چکان و زمان آبیاری) روابطی را برای برآورد سطح خیس‌شده در سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی پیشنهاد دادند.

$$A_d = 9.752\ (K_S)^{0.143}\ (Q)^{0.619}\ (t)^{0.762} \quad (۱۲)$$

$$A_d = 4.452\ (K_S)^{0.162}\ (Q)^{0.612}\ (t)^{0.775} \quad (۱۳)$$

$$A_{up} = 3.714\ (K_S)^{0.12}\ (Q)^{0.626}\ (t)^{0.747} \quad (۱۴)$$

$$A_{up} = 8.723\ (K_S)^{0.354}\ (Q)^{0.548}\ (t)^{0.903} \quad (۱۵)$$

معادله (۱۲) برای سیستم آبیاری سطحی، معادله (۱۳) برای سیستم آبیاری زیر سطحی، معادله (۱۴) برای سیستم آبیاری زیر سطحی (با عمق نصب قطره‌چکان ۱۵ سانتی‌متر) و معادله (۱۵) برای سیستم آبیاری زیر سطحی (با عمق نصب قطره‌چکان ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر) می‌باشد. در این معادلات: زمان آبیاری (t) بر حسب دقیقه، دبی خروجی از قطره‌چکان‌ها (q) بر حسب لیتر در ساعت، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s) بر حسب متر بر ساعت و مساحت بالا و پایین قطره‌چکان بر حسب متر مربع می‌باشد.

نتایج و بحث

مقایسه سیستم آبیاری پالسی و پیوسته

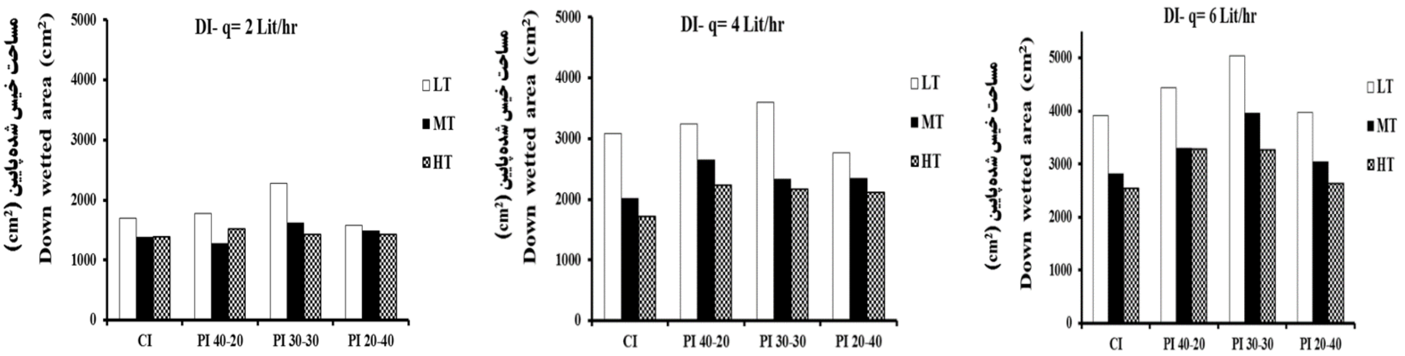
سطح خیس شده اطراف قطره‌چکان در سیستم های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۱۲). نتایج شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نشان می‌دهد مساحت خیس شده اطراف قطره‌چکان برای شرایط کاربرد پالسی و پیوسته متفاوت می‌باشد و همچنین برای آزمایش‌های مختلف در سیستم آبیاری پالسی نیز سطح خیس شده اطراف قطره‌چکان متفاوت می‌باشد. همچنین نتایج اشکال ۳ و ۴ نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین سطح خیس شده پایین قطره‌چکان (برای سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی) به ترتیب مربوط به خاکهای شنی و رسی می‌باشد زیرا در خاک‌های شنی منافذ درشت‌تر می‌باشد و آب قابلیت گسترش در جهت عمودی (به سمت پایین) را بیشتر دارد و برعکس در خاک‌های رسی خاک قابلیت حرکت به سمت پایین را ندارد. همچنین بیشترین سطح خیس شده بالای قطره‌چکان در سیستم آبیاری زیر سطحی مربوط به خاک‌های لومی و رسی می‌باشد و این بدین خاطر می‌باشد که در این خاک‌ها هدایت موئینگی بیشتر می‌باشد و آب قابلیت گسترش به سمت بالا را بیشتر دارد (شکل ۵). نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد که در سیستم آبیاری سطحی که بیشترین سطح خیس شده پایین قطره‌چکان مربوط به PI(30-30) با دبی ۶ لیتر در ساعت می‌باشد و کمترین سطح خیس شده پایین قطره‌چکان مربوط به سیستم آبیاری پیوسته با دبی ۲ لیتر در ساعت می‌باشد. نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که بیشترین مساحت خیس شده پایین قطره‌چکان (برای سیستم آبیاری زیر سطحی) مربوط به PI(30-30) می‌باشد و همانطور که از اشکال ۴ و ۵ نتیجه می‌شود که در تمام مورد بررسی با افزایش دبی قطره‌چکان‌ها سطح خیس شده بالا و پایین به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. همچنین نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش عمق نصب قطره‌چکان در سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی اختلاف بین سطح خیس شده بالای قطره‌چکان در خاک‌های لومی و رسی در مقایسه با خاک شنی بیشتر می‌شود و به عبارت دیگر در خاک‌های شنی با افزایش عمق نصب قطره‌چکان امکان رسیده جبهه حرکت آب به سطح زمین به مراتب کمتر از خاک‌های لومی و رسی می‌باشد. پس جهت استفاده از سیستم آبیاری زیر سطحی برای خاک‌های شنی بایستی عمق نصب قطره‌چکان کمتر در نظر گرفته شود. این نتایج با پژوهش کریمی و همکاران (۱۱) همخوانی دارد.

مدل‌های پیشنهادی

ارزیابی عملکرد مدل‌های ارائه شده

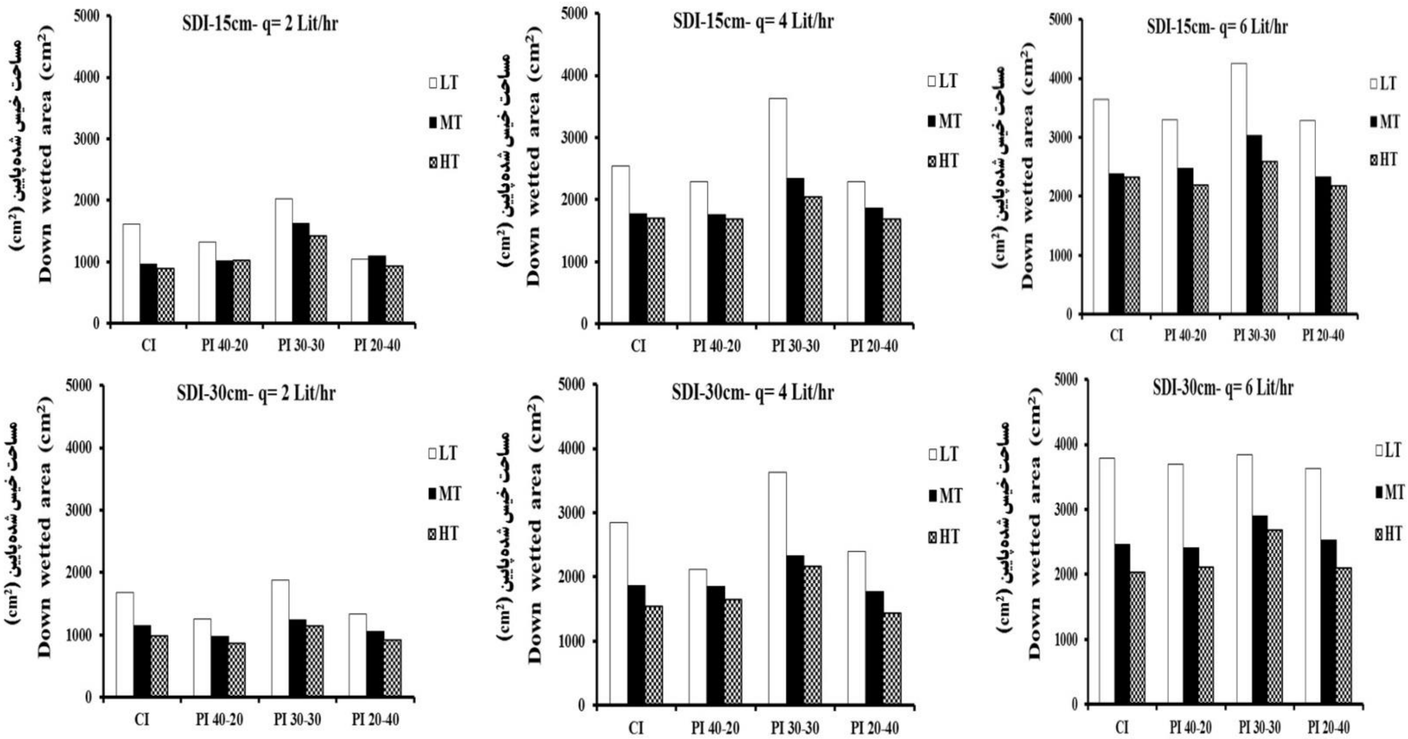
در این تحقیق به کمک داده‌های آزمایشگاهی و با استفاده از تولبار Solver در برنامه مایکروسافت آفیس ۲۰۱۰ و با انجام آنالیز رگرسیون غیر خطی ضرایب معادلات (۴) تا (۹) بهینه گردید و مقادیر این ضرایب در جدول ۳ آورده شده است. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد

که مـدل پیشـنهادی بـرای سیسـتم آبیـاری پیوسـته و پالسـی دارای عملکرد قابل قبولی می‌باشد و پارامترهای آماری در دامنه قابل قبـولی می‌باشد (با توجه به تحقیق کریمی و همکاران، ۲۰۱۵). بـا توجـه بـه جـدول ۳ مقـادیر پارامترهـای آمـاری MAE، RMSE و R^2 بـرای پیش‌بینی سطح خیس شـده پـایین قطـره‌چکـان در سیسـتم آبیـاری قطره‌ای سـطحی بـا کـاربرد پیوسـته (معادلـه ۴) بـه ترتیـب مقـادیر ۰/۰۰۳۱، ۰/۰۰۴ و ۰/۹۹ می‌باشد. این مقادیر برای سطح خیس شـده پایین قطره‌چکان در سیستم آبیـاری قطـره‌ای زیـر سـطحی پیوسـته (معادلـه ۵) بـه ترتیـب مقـادیر ۰/۰۰۲۵، ۰/۰۰۳۳ و ۰/۹۹ مـی‌باشـد. همچنین ایـن مقـادیر بـرای پـیش‌بینـی سـطح خـیس شـده بـالای قطره‌چکان (معادله ۶) بـه ترتیـب مقـادیر ۰/۰۰۳۹، ۰/۰۰۴۴ و ۰/۹۵ می‌باشد. همچنین در جدول ۳ مقادیر پارامترهـای آمـاری ذکـر شـده برای تخمین سطح خیس شده پایین قطره‌چکـان در سیسـتم آبیـاری قطره‌ای سطحی با کاربرد پالسی (معادله ۴) به ترتیب مقادیر ۰/۰۰۴۴، ۰/۰۰۵۷ و ۰/۹۹ می‌باشد. همچنین این مقادیر برای پیش‌بینی سطح خیس شده پایین و بالای قطره‌چکان در سیستم آبیاری قطـره‌ای زیـر سطحی (معادله ۷ و ۸) به ترتیب مقـادیر ۰/۰۰۴۴، ۰/۰۰۵۶ ، ۰/۹۹ و ۰/۰۰۳۳، ۰/۰۰۴۴ ، ۰/۹۶ می‌باشد. این نتایج بیـانگر ایـن اسـت کـه مدل‌های پیشنهادی در سیستم آبیاری پیوسته و پالسی دارای عملکرد مناسبی می‌باشند.



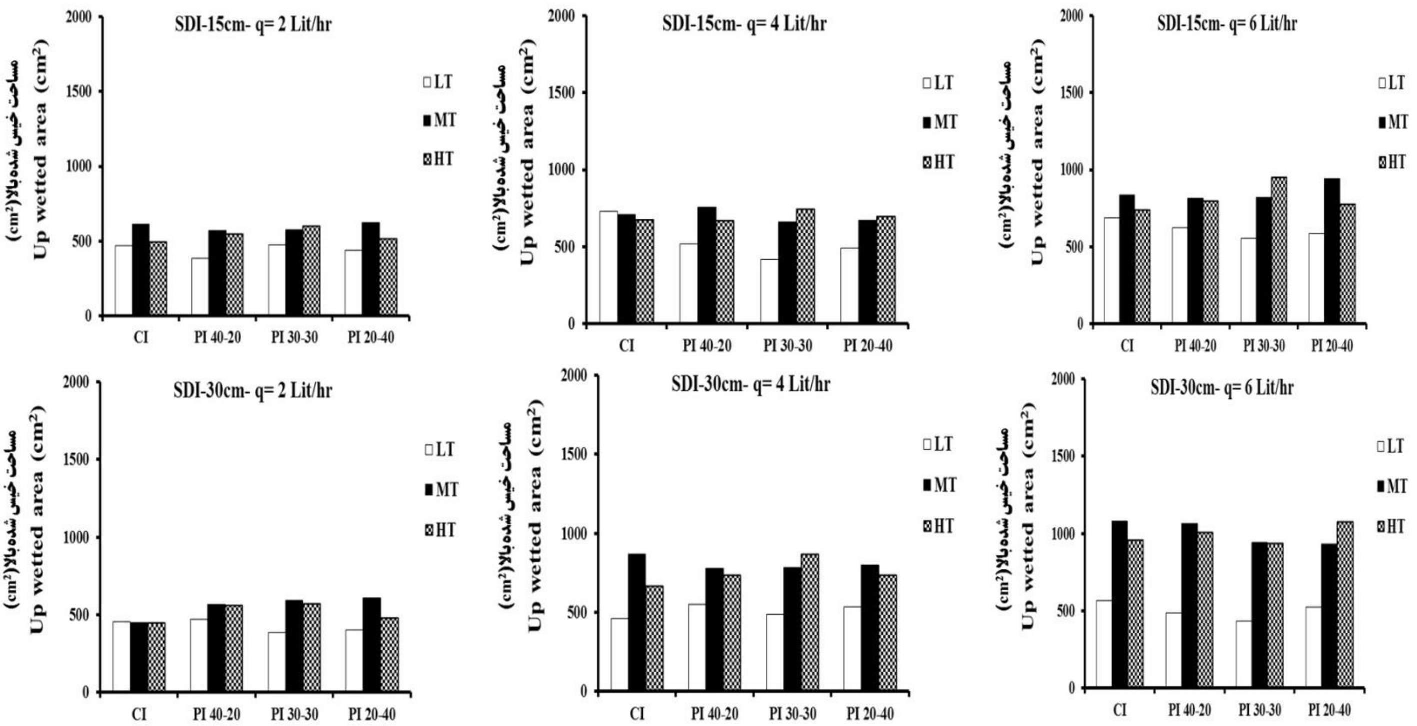
شکل ۳- مقایسه مساحت خیس شده پایین قطره‌چکان برای سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی پیوسته و پالسی

Figure 3- Comparison of down wetted area of emitter for continuous and pulse surface drip irrigation



شکل ٤- مقایسه مساحت خیس شده پایین قطره‌چکان برای سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی پیوسته و پالسی

Figure 4- Comparison of down wetted area of emitter for continuous and pulse subsurface drip irrigation



شکل ۵- مقایسه مساحت خیس شده بالای قطره‌چکان برای سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی پیوسته و پالسی

Figure 5- Comparison of up wetted area of emitter for continuous and pulse subsurface drip irrigation

جدول ۳- ضرایب مدل‌های پیشنهادی با شاخص‌های آماری

Table 3- The coefficients of the suggested models with statistical indices

Eq. (4)	a	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	-	-	MAE	RMSE	R^2
	1.745	0.754	0.613	0.126	0.207	0.174	0.118	0.824	-0.253	-	-	0.0031	0.004	0.99
Eq. (5)	b	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	-	MAE	RMSE	R^2
	0.885	0.76	0.733	0.347	0.205	0.147	0.085	0.87	0.057	0.039	-	0.0025	0.0033	0.99
Eq. (6)	c	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	-	MAE	RMSE	R^2
	1.171	0.495	0.514	-0.181	0.316	0.292	0.107	1.097	-0.308	0.058	-	0.0036	0.0044	0.95
Eq. (7)	d	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	-	MAE	RMSE	R^2
	0.694	0.657	0.653	0.378	0.291	0.365	0.267	0.899	-0.188	0.777	-	0.0044	0.0057	0.99
Eq. (8)	e	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9	e_{10}	MAE	RMSE	R^2
	0.327	0.679	0.834	0.075	0.475	0.124	0.096	2.111	0.363	-0.021	0.814	0.0044	0.0056	0.99
Eq. (9)	f	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	MAE	RMSE	R^2
	1.242	0.435	0.46	-0.143	0.265	0.264	0.166	1.431	0.168	0.064	0.494	0.0033	0.0044	0.96

سیستم آبیاری پیوسته

ارزیابی مقایسه بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای سیستم آبیاری سطحی با کاربرد پیوسته نشان می‌دهد (جدول ۴) که در مدل پیشنهادی مقادیر خطای MAE برای پیش‌بینی سطح خیس شده پایین قطره‌چکان از ۰/۰۰۲۹تا ۰/۰۰۳۳ متر مربع متغییر می‌باشد در حالی که این مقادیر برای مدل کریمی و همکاران (۱۲) از ۰/۰۲۹۳ تا ۰/۰۵۰۳ متر مربع نوسان دارد. همچنین مقادیر RMSE برای مدل پیشنهادی از ۰/۰۰۳۶ تا ۰/۰۰۴۴ متر مربع متغییر می‌باشد و برای کریمی و همکاران (۱۲) از ۰/۰۳۷۷ تا ۰/۰۶۸۶ متر مربع متغییر است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی نسبت به مدل کریمی و همکاران (۱۲) که بر مبنای تحلیل ابعادی توسعه داده شده است، دارای عملکرد بهتری می‌باشد. همچنین در شکل ۶ مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده در مقایسه با مقادیر شبیه‌سازی شده (با خط نیمساز ۱:۱) نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی عملکرد مناسبی در تخمین سطح خیس شده برای آبیاری قطره‌ای سطحی دارد. همچنین نتایج ارزیابی مدل پیشنهادی در جدول ۴ نشان می‌دهد که در سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی مقادیر MAE و RMSE برای پیش‌بینی سطح خیس شده پایین قطره‌چکان به ترتیب بین

۰/۰۰۳۹-۰/۰۰۱۶ و ۰/۰۰۳۹-۰/۰۰۲۱ متر مربع متغییر می‌باشد در حالی که این مقادیر برای مدل کریمی و همکاران (۱۲) به ترتیب ۰/۰۸۴۲-۰/۰۳۱۸ و ۰/۱۰۹۱-۰/۰۴۰۳ متر مربع نوسان دارد. همچنین در سیستم آبیاری زیر سطحی (پیش‌بینی سطح خیس شده پایین قطره‌چکان) مقادیر R^2 برای مدل پیشنهادی ۰/۹۹-۰/۹۸ و برای مدل کریمی و همکاران (۱۲) این مقادیر بین ۰/۹۹-۰/۹۶ متغییر است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی سطح خیس شده پایین قطره‌چکان را در سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی با دقت بالایی پیش‌بینی می‌کند. نتایج مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که در مدل پیشنهادی مقادیر MAE و RMSE برای پیش‌بینی سطح خیس شده بالای قطره‌چکان به ترتیب بین ۰/۰۰۴۵-۰/۰۰۲۶ و ۰/۰۰۵۲-۰/۰۰۳۶ متر مربع متغییر می‌باشد در صورتی‌که دامنه تغییرات این مقادیر برای مدل کریمی و همکاران (۱۲) به ترتیب ۰/۰۱۹۵-۰/۰۰۸۴ و ۰/۰۲۱۴-۰/۰۱۲۸ متر مربع می‌باشد که این هم به نوبه خود برتری مدل پیشنهادی را نسبت به مدل کریمی و همکاران (۱۲) نشان می‌دهد. همچنین مقادیر R^2 برای مدل پیشنهادی و مدل کریمی و همکاران (۱۲) به ترتیب بین ۰/۹۷-۰/۹۴ و ۰/۹۵-۰/۸۳ متر مربع نوسان دارد. همچنین در شکل ۷ مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با خط نیمساز ۱:۱ نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی سطح خیس شده بالای و پایین قطره‌چکان زیر سطحی (با عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر) را با خطای کمتری پیش‌بینی می‌کند.

سیستم آبیاری پالسی

نتایج شاخص‌های آماری جدول ۵ نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی سطح خیس شده بالا و پایین قطره‌چکان را در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی با کاربرد پالسی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌کند (در مقایسه با تحقیق کریمی و همکاران (۱۲) شاخص‌های آماری به طور نسبی بهتر می‌باشد). نتایج مقایسه بین داده‌های اندازه‌گیری شده با داده‌های شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که مقادیر MAE و RMSE برای پیش‌بینی سطح خیس شده پایین قطره‌چکان (برای آبیاری قطره‌ای سطحی) به ترتیب بین ۰/۰۰۶۵-۰/۰۰۲۷ و ۰/۰۰۸۲-۰/۰۰۳۴ مترمربع متغییر می‌باشد و مقادیر R^2 نیز بین ۰/۹۹-۰/۹۸ نوسان می‌کند و این نشان دهنده عملکرد مناسب این مدلها می‌باشند.

جدول ٤- پارامترهای آماری برای مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مساحت خیس شده بالا و پایین قطره‌چکان برای سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی پیوسته

Table 4- Statistical parameters for the comparison of measured and predicted values of up and down wetted area in continuous surface and subsurface drip irrigation

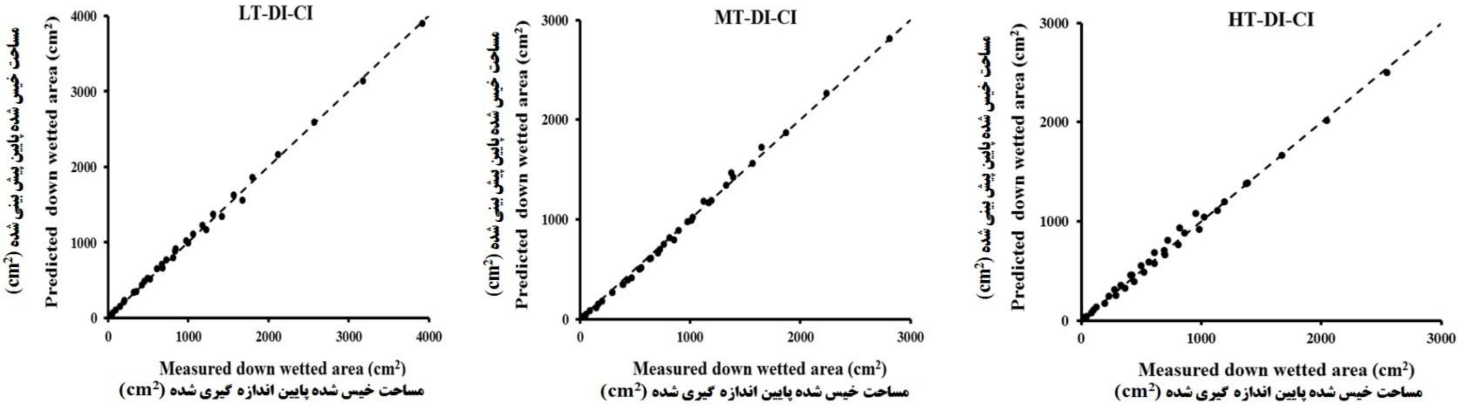
آزمایش (Experiment)	مساحت خیس شده (Wetted area)					
	R^2		MAE (m^2)		RMSE (m^2)	
	A_d	A_{up}	A_d	A_{up}	A_d	A_{up}
LT-DI	0.99 (0.99)	-	0.0031 (0.0503)	-	0.0041(0.0686)	-
MT-DI	0.99 (0.99)	-	0.0029 (0.0394)	-	0.0036 (0.0482)	-
HT-DI	0.99 (0.98)	-	0.0033 (0.0293)	-	0.0044 (0.0377)	-
LT-SDI-15	0.99 (0.99)	0.96 (0.88)	0.0024 (0.0743)	0.0037 (0.0133)	0.0031 (0.097)	0.0046 (0.0147)
LT-SDI-30	0.99 (0.99)	0.94 (0.91)	0.0019 (0.0842)	0.004 (0.0084)	0.0024 (0.1091)	0.0052 (0.0128)
MT-SDI-15	0.99 (0.99)	0.97 (0.94)	0.0018 (0.0477)	0.0035 (0.0195)	0.0021 (0.0628)	0.0041 (0.0214)
MT-SDI-30	0.99 (0.99)	0.97 (0.84)	0.0034 (0.0509)	0.0045 (0.017)	0.0039 (0.0655)	0.0052 (0.0199)
HT-SDI-15	0.98 (0.96)	0.96 (0.95)	0.0039 (0.0354)	0.0031 (0.0152)	0.0046 (0.0436)	0.0036 (0.0165)
HT-SDI-30	0.99 (0.99)	0.96 (0.83)	0.0016 (0.0318)	0.0026 (0.0114)	0.0029 (0.0403)	0.0039 (0.0134)

The numbers in parentheses refer to the model of Karimi et al. 2015a (اعداد داخل پرانتز مربوط به مدل کریمی و همکاران (۲۰۱۵) می‌باشد)

LT, MT and HT refer to light texture, medium texture and heavy texture, respectively (LT، MT وHT به ترتیب اشاره به بافت سبک، متوسط و سنگین دارد)

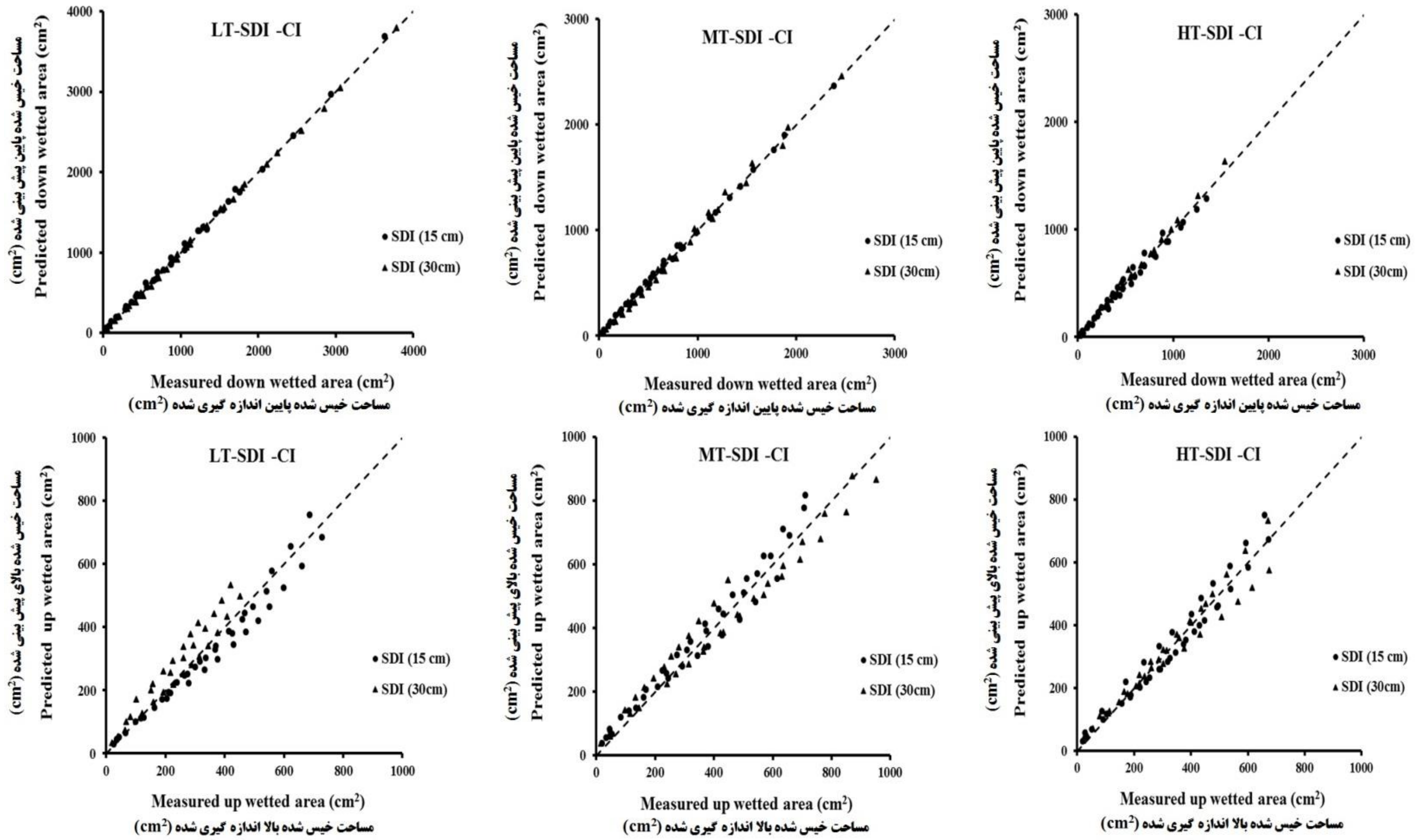
DI AND SDI-15 refer to surface drip irrigation and subsurface drip irrigation with installation depth 15 cm, respectively

DI و SDI-15 به ترتیب اشاره به سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی با عمق نصب ۱۵ سانتی‌متر دارد



شکل ٦- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مساحت خیس شده پایین قطره‌چکان برای سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی پیوسته با خط ۱:۱

Figure 6- Comparison of measured and predicted values of down wetted area for continuous surface drip irrigation with 1:1 line



شکل ۷- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مساحت خیس شده بالا و پایین قطره‌چکان برای سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی پیوسته با خط ۱:۱

Figure 7- Comparison of measured and predicted values of up and down wetted area for continuous subsurface drip irrigation with 1:1 line

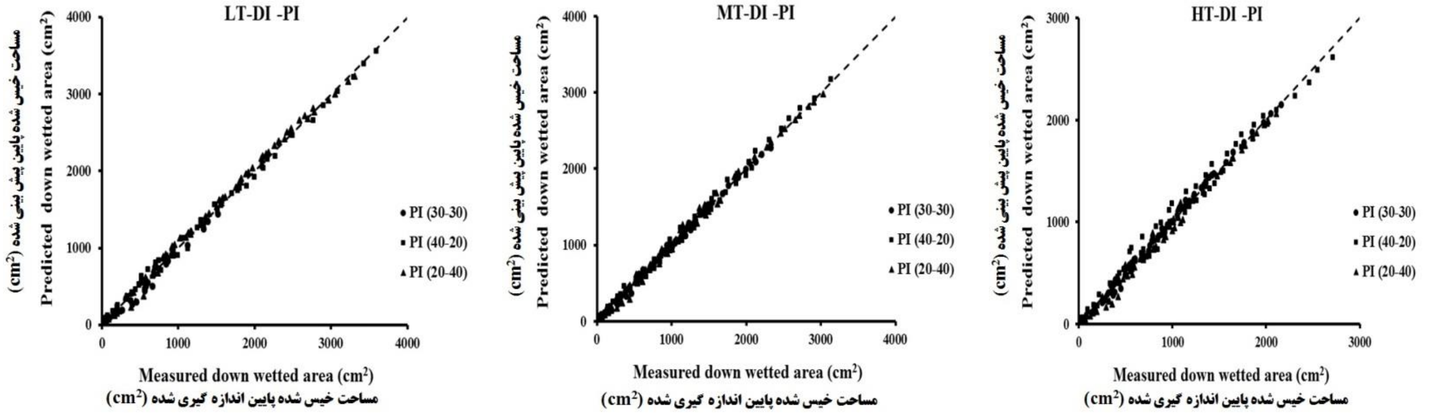
همچنین در شکل ۸ مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با خط نیم ساز ۱:۱ نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی برای تمامی پالس‌های مورد بررسی (۴۰-۲۰، ۳۰-۳۰ و ۲۰-۴۰) و برای تمامی خاک‌های مورد بررسی (MT,LT,HT) با دقت بالایی سطح خیس شده را در آبیاری قطره‌ای سطحی پیش‌بینی می‌کند. همچنین پارامترهای آماری جدول ۵ نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی برای سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی با کاربرد پالسی نیز عملکرد مناسبی دارد و قادر است سطح خیس شده بالا و پایین قطره‌چکان را

با خطای کمتری پیش‌بینی کند. نتایج ارزیابی مدل مذکور نشان می‌دهد که دامنه تغییرات مقادیر MAE و RMSE برای پیش‌بینی سطح خیس شده پایین قطره‌چکان به ترتیب بین ۰/۰۰۷۷–۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۹۸–۰/۰۰۳۲ متر مربع می‌باشد و دامنه تغییرات مقادیر R^2 بین ۰/۹۹–۰/۹۱ می‌باشد. همچنین این مدل‌ها سطح خیس شده بالای قطره‌چکان را نیز با خطای کمتری پیش‌بینی می‌کند و مقادیر MAE و RMSE برای آزمایش‌های مورد بررسی به ترتیب بین ۰/۰۰۶۷–۰/۰۰۱۵ و ۰/۰۰۷۷–۰/۰۰۱۹ متر مربع متغییر است و مقادیر R^2 بین ۰/۹۹–۰/۸۹ متغییر است. در شکل ۹ نتایج مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با خط نیمساز ۱:۱ نشان می‌دهد که ارائه شده سطح خیس شده بالای قطره‌چکان زیرسطحی را نیز با دقت مناسبی پیش‌بینی می‌کند. علت اینکه مدل‌های پیشنهادی سطح خیس شده سطح خیس شده پایین قطره‌چکان را بهتر از سطح خیس شده بالای قطره‌چکان پیش‌بینی می‌کنند این است که در قطره‌چکانهای زیرسطحی هنگامیکه جبهه رطوبتی به سطح زمین می‌رسد شکل پیاز رطوبتی بالای قطره‌چکان از حالت نیم‌دایره یا نیم بیضی شکل خارج شده و از این زمان به بعد، افزایش مساحت خیس شده بالای قطره‌چکان به صورت یک شکل نامنظم می‌باشد و در جهت افقی جبهه رطوبتی مساحت افزایش می‌یابد اما جبهه رطوبتی پایین قطره‌چکان همیشه به صورت نیم دایره یا نیم بیضی می‌باشد و شکل کلی پیاز رطوبتی تغییر اساسی نمی‌کند و به همین دلیل مدل پیش‌بینی مناسبتری از آن دارد. همچنین نتایج ارزیابی کلی مدلهای ارائه شده در جدول ۶ نشان می‌دهد که پارامترهای آماری SI، R^2 و NSE در سیستم آبیاری سطحی و زیر سطحی (با کاربرد پیوسته) و برای مساحت خیس شده پایین قطره‌چکان به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۰۴۸۳، ۰/۹۹۶ و ۰/۹۹، ۰/۰۴۴۱ ، ۰/۹۹۷ می‌باشد و همچنین این مقادیر برای مساحت خیس شده بالای قطره‌چکان ۰/۹۵، ۰/۱۳۲، ۰/۹۹۶ می‌باشد. همچنین پارامترهای آماری مذکور برای سیستم آبیاری سطحی و زیر سطحی (با کاربرد پالسی) و برای مساحت خیس شده پایین قطره‌چکان به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۰۵۴۸، ۰/۹۹۴ و ۰/۹۹، ۰/۰۷۹۵ ، ۰/۹۹ می‌باشد و برای مساحت خیس شده بالای قطره‌چکان ۰/۹۶، ۰/۱۰۹، ۰/۹۵۷ می‌باشد این پارامترهای آماری نشان می‌دهد که مدل‌های ارائه شده دارای کارایی بالایی می‌باشند.

جدول ۵- پارامترهای آماری برای مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مساحت خیس شده بالا و پایین قطره‌چکان برای سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی پالسی

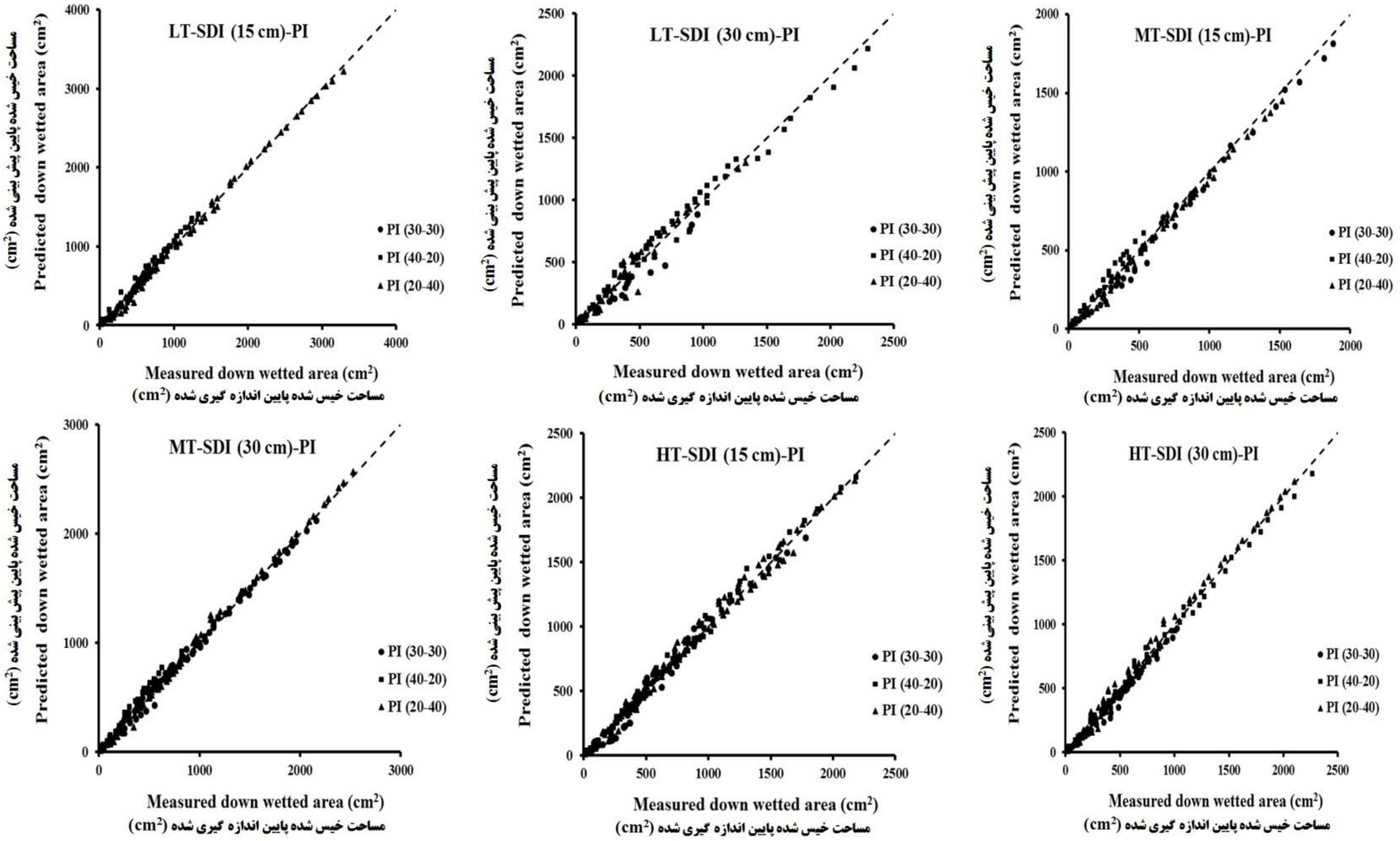
Table 5- Statistical parameters related to comparison of measured and predicted values of up and down wetted area for pulse surface and subsurface drip irrigation

آزمایش Experiment	پالسی Pulse	مساحت خیس شده Wetted area					
		R^2		MAE (m^2)		RMSE (m^2)	
		A_d	A_{up}	A_d	A_{up}	A_d	A_{up}
LT-DI	30-30	0.98	-	0.0065	-	0.0082	-
LT-DI	40-20	0.99	-	0.0049	-	0.0059	-
LT-DI	20-40	0.99	-	0.0047	-	0.0057	-
MT-DI	30-30	0.99	-	0.0029	-	0.0036	-
MT-DI	40-20	0.99	-	0.0048	-	0.0056	-
MT-DI	20-40	0.98	-	0.0038	-	0.0051	-
HT-DI	30-30	0.99	-	0.0027	-	0.0034	-
HT-DI	40-20	0.98	-	0.006	-	0.0077	-
HT-DI	20-40	0.99	-	0.0046	-	0.0058	-
LT-SDI-15	30-30	0.91	0.92	0.002	0.0034	0.0032	0.0041
LT-SDI-15	40-20	0.98	0.98	0.0056	0.0016	0.0066	0.0019
LT-SDI-15	20-40	0.99	0.95	0.0043	0.0033	0.0055	0.0044
LT-SDI-30	30-30	0.97	0.89	0.0077	0.0036	0.0098	0.0055
LT-SDI-30	40-20	0.98	0.91	0.0061	0.0049	0.0073	0.0058
LT-SDI-30	20-40	0.95	0.97	0.0054	0.0021	0.007	0.0027
MT-SDI-15	30-30	0.99	0.97	0.0052	0.0031	0.0064	0.004
MT-SDI-15	40-20	0.98	0.98	0.0039	0.002	0.0048	0.0027
MT-SDI-15	20-40	0.99	0.96	0.0035	0.0037	0.0042	0.0044
MT-SDI-30	30-30	0.99	0.99	0.0032	0.0021	0.0041	0.0026
MT-SDI-30	40-20	0.99	0.99	0.0051	0.0035	0.0066	0.0044
MT-SDI-30	20-40	0.99	0.99	0.0034	0.0015	0.0045	0.0019
HT-SDI-15	30-30	0.98	0.96	0.0057	0.0054	0.0069	0.007
HT-SDI-15	40-20	0.99	0.99	0.0034	0.0026	0.0045	0.0033
HT-SDI-15	20-40	0.99	0.99	0.0039	0.0041	0.0051	0.0046
HT-SDI-30	30-30	0.97	0.98	0.0056	0.0025	0.0068	0.0031
HT-SDI-30	40-20	0.99	0.99	0.0035	0.0026	0.0044	0.0031
HT-SDI-30	20-40	0.99	0.93	0.0042	0.0067	0.005	0.0077



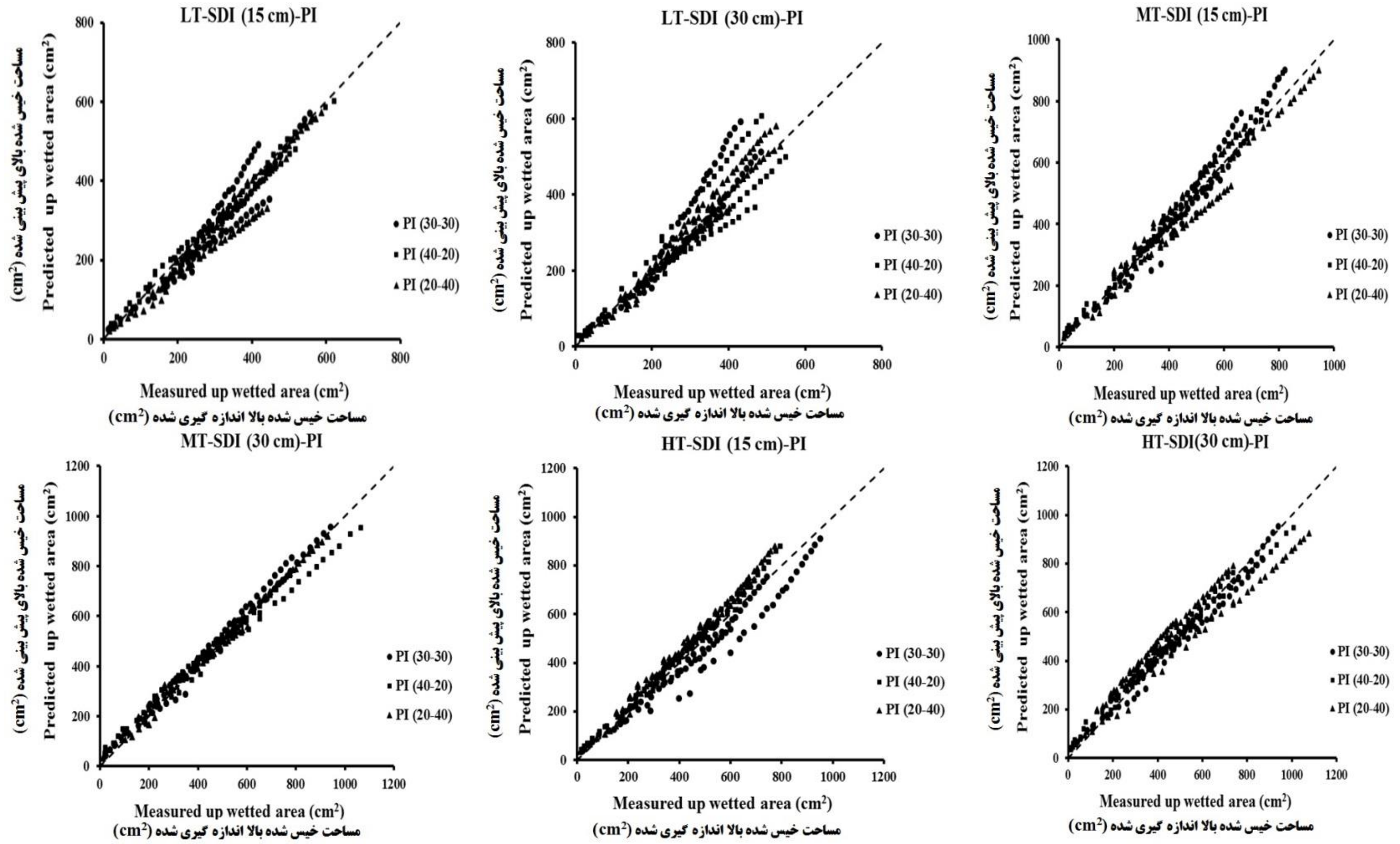
شکل ۸- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مساحت خیس شده پایین قطره‌چکان برای سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی پالسی با خط ۱:۱

Figure 8- Comparison of measured and predicted values of down wetted area for pulse surface drip irrigation with 1:1 line



شکل ۹- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مساحت خیس شده پایین قطره‌چکان برای سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی پالسی با خط

Figure 9- Comparison of measured and predicted values of down wetted area for pulse subsurface drip irrigation with 1:1 line



شکل ۱۰- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مساحت خیس شده بالای قطره‌چکان برای سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی پالسی با خط

Figure 10- Comparison of measured and predicted values of up wetted area for pulse subsurface drip irrigation with 1:1 line

جدول ٦- پارامترهای آماری برای ارزیابی کلی مدلهای ارائه شده در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی

Table 5- Statistical parameters for general evaluation in surface and subsurface drip irrigation

پارامتر **Parameter**	کاربرد **Application**	مساحت خیس شده **Wetted area**					
		R^2		SI		NS	
		A_d	A_{up}	A_d	A_{up}	A_d	A_{up}
DI	Continuous	0.99	-	0.0483	-	0.996	-
SDI-Down	Continuous	0.99	-	0.0441	-	0.997	-
SDI-Up	Continuous	-	0.95	-	0.1338	-	0.951
DI	Pulse	0.99	-	0.0548	-	0.994	-
SDI-Down	Pulse	0.99	-	0.0795	-	0.99	-
SDI-Up	Pulse	-	0.96	-	0.109	-	0.96

نتیجه‌گیری

در این تحقیق مجموعه‌ای از آزمایشات برای سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی، با استفاده از سه دبی مختلف (۲، ۴ و ۶ لیتر در ساعت)، سه نوع خاک مختلف (رسی، لومی رسی شنی و شنی لومی)، برای دو سیستم آبیاری پیوسته و پالسی (با نسبت ۴۰-۲۰، ۳۰-۳۰ و ۲۰-۴۰) به انجام رسید. نتایج حاصل از آزمایشات نشان می‌دهد که مساحت خیس شده اطراف قطره‌چکان برای شرایط کاربرد پالسی و پیوسته، برای خاک‌های و دبی‌های مورد بررسی مقادیر متفاوتی می‌باشد. نتایج نشان داد که بیشترین سطح خیس شده پایین قطره‌چکان (برای سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی) مربوط به خاک‌های شنی می‌باشد و همچنین بیشترین سطح خیس شده بالای قطره‌چکان در سیستم آبیاری زیر سطحی مربوط به خاک لومی و رسی می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که برای

آزمایش‌های مربوط به کاربرد آب، بیشترین سطح خیس شده پایین قطره‌چکان مربوط به سیستم آبیاری پالسی با کاربرد ۳۰-۳۰ می‌باشد. سپس با توجه به اهمیت مساحت خیس شده پیاز رطوبتی، با استفاده از آنالیز رگرسیون غیرخطی مدل‌های تجربی مختلفی برای پیش‌بینی سطح خیس شده بالا و پایین قطره‌چکان در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی ارئه گردید. سپس عملکرد مدل‌های پیشنهادی با مقایسه بین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل‌های تجربی پیشنهادی توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی سطح خیس شده دارند. همچنین نتایج پارامترهای ارزیابی نشان داد که در آبیاری پیوسته و برای سیستم آبیاری سطحی و زیر سطحی و پارامترهای آماری R^2، SI و NSE برای مساحت خیس شده پایین قطره‌چکان به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۰۴۸۳، ۰/۹۹۶ و ۰/۹۹، ۰/۰۴۴۱ ، ۰/۹۹۷ می‌باشد و همچنین این مقادیر برای مساحت خیس شده بالای قطره‌چکان (در آبیاری زیر سطحی) ۰/۹۵، ۰/۱۳۲، ۰/۹۹۶ می‌باشد. همچنین در آبیاری پالسی پارامترهای آماری مذکور برای سیستم آبیاری سطحی و زیر سطحی و برای مساحت خیس شده پایین قطره‌چکان به‌ترتیب ۰/۹۹، ۰/۰۵۴۸، ۰/۹۹۴ و ۰/۹۹، ۰/۰۷۹۵ ، ۰/۹۹ می‌باشد و برای مساحت خیس شده بالای قطره‌چکان ۰/۹۶، ۰/۱۰۹، ۰/۹۵۷ می‌باشد این پارامترهای آماری نشان می‌دهد که مدل‌های ارائه شده دارای کارایی بالایی می‌باشند. همچنین به طور نسبی مدلهای ارائه برای مساحت خیس شده پایین قطره‌چکان (هم در سیستم پیوسته و هم بای پالسی) در مقایسه با مدل‌های ارائه شده برای تخمین مساحت خیس شده بالای قطره‌چکان دارای دقت به مراتب بیشتری می‌باشند. دلیل این امر بدین خاطر می‌باشند که این مدل‌ها که برای سیستم آبیاری زیر سطحی می‌باشد هنگامی که جبهه رطوبتی به سطح زمین می‌رسد الگو و شکل پیاز رطوبتی تغییر می‌کند و بدین خاطر مدل‌ها به خوبی تخمین دقیقی از مساحت خیس شده بالای قطره‌چکان ندارند ولی مدل‌های ارائه شده برای مساحت خیس شده پایین قطره‌چکان الگو پیاز رطوبتی به طور یکنواخت (به صورت نیم دایره) حفظ می‌شود. استفاده روابط در طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی می‌تواند به عنوان یک دستورالعمل مفید می‌تواند باعث بهبود عملکرد این سیستم‌ها گردد.

منابع

1- Al-Ogaidi A.A.M., Wayayok A., Rowshona M.K., and Abdullah A.F. 2016. Wetting patterns estimation under drip irrigation systems using an enhanced empirical model. Agricultural Water Management 176: 203-213.

2- Amin M.S.M., and Ekhmaj A.I.M. 2006. DIPAC- drip irrigation water distribution pattern calculator. In: 7th Int Micro Irrigation Congress PWTC, Kuala Lumpur,Malaysia, pp. 503–513.

3- Arbat G., Puig-Bargués J., Duran-Ros M., Barragán J., and Ramírez de Cartagena F. 2013. Drip-Irriwater: Computer software to simulate soil wetting patterns under surface drip irrigation. Computer and Electronic in Agriculture 98: 183–192.

4- Cook F.J., Thorburn P.J., Fitch P., and Bristow K.L. 2003. WetUp: a software tool to display approximate wetting patterns from drippers. Irrigation Science 22: 129–134.

5- Elmaloglou S., and Diamantopoulos E. 2010. Soil water dynamics under surface trickle irrigation as affected by soil hydraulic properties, discharge rate, dripper spacing and irrigation duration. Irriggation and Drainage. 263: 254–263.

6- Elmaloglou S., Soulis K.X., and Dercas N. 2013. Simulation of Soil Water Dynamics under Surface Drip Irrigation from Equidistant Line Sources. Water Resource Management. 27: 4131–4148.

7- Hammami M., and Zayani K. 2016. An analytical approach to predict the moistened bulb volume beneath a surface point source. Agricultural Water Management 166: 123–129.

8- Kandelous M.M., Liaghat A., and Abbasi F. 2008. Estimation of soil moisture pattern in subsurface drip irrigation using dimensional analysis method. Iranian Journal of Agricultural Science. 39(2): 371–378. (In Persian)

9- Kandelous M.M., and Simunek J. 2010. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. Agricultural Water Management 97: 1070–1076.

10- Kandelous M.M., Simunek J., Van Genuchten M.Th., and Malek K. 2011. Soil Water Content Distributions between Two Emitters of a Subsurface Drip Irrigation System. Soil Physics 75 (2): 488–497.

11- Karimi B., Sohrabi T., Mirzaei F., and Rodriquez-Sinobas L. 2012. Evaluation of wetting area and water distribution on different soils in subsurface drip irrigation emitters. EGU General Assembly. Vienna, Austria. 22-27 April.

12- Karimi B., Mirzaei F., and Sohrabi T. 2015a. Developing Equations to Estimate Wetted Area Pattern for Surface and Subsurface Drip Irrigation Systems by Dimensional Analysis. Iranian Journal of Soil and Water Science 25(3): 241:252. (in Persian with English abstract)

13- Karimi B., Sohrabi T., Mirzaei F., and Ababaei B. 2015b. Developing Equations to Estimate the Advance Velocity of the Wetting Front in Surface and Subsurface Drip Irrigation Systems by Dimensional

Analysis. Iranian Journal of Soil and Water Science 25(1): 101:112. (in Persian with English abstract)
14- Karimi B., and Mohammadi P. 2018. Evaluation of Artificial Neural Network for estimating the Advance Velocity of the Wetting Front in Drip Irrigation. Iranian Journal of Water Research in Agriculture. 32(1): 79-92. (in Persian with English abstract)
15- Karimi B., and Alinazari F. 2019.Simulation of Full Shape of Wetting Bulb in Subsurface Drip Irrigation System with Nonlinear Regression Model. Iranian Journal of Water Research in Agriculture 33(2): 327-338. (in Persian with English abstract)
16- Karimi B., and Karimi N. 2019. Simulation of the advance Velocity of the Wetting Front in pulse Drip Irrigation Systems by nonlinear regression mode. Iranian Journal of Irrigation and Drainage 13(5): 1374-1387. (in Persian with English abstract)
17- Karmeli D., and Peri G. 1974. Basic principles of pulse irrigation. Irrigation and Drainage Division 100(3): 309-319.
18- Khanmohammadi N., and Besharat S. 2018. Wetting Pattern Dimensions Determination in Drip Irrigation by Coupling the HYDRUS-2D Software and Backingham π Theorem in Texturally Different Soils. Iranian Journal of Applied soil Reseach 6(2): 109-118. (in Persian with English abstract)
19- Khattak M.Sh., Ali W., Ajmal M., Khalil T.M., Ahmad J., Malik A., and Akbar Gh. 2017. Assessment of wetted irrigation patterns for inline and online emitters in different soil textures. Himalayan Earth Science. 50 (2): 149-163.
20- Levin I., Van Rooyen P.C., and Van Rooyen F.C. 1979. The effect of discharge rate and intermittent water application by point source irrigation on the soil moisture distribution pattern. Soil Science Society of America Journal 43: 8–16.
21- Li J., Zhang J., and Ren L. 2003. Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source. Irrigation Science. 22(1): 19–30.
22- Li Jiusheng., Zhang J., and Rao M. 2004. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. Agricultural Water Management 67: 89–104.
23- Li J., Ji Hong-yan., Li Bei., and Li Yu-chun. 2007. Wetting Patterns and Nitrate Distributions in Layered-Textural Soils Under Drip Irrigation. Journal of Agricultural Sciences in China 6(8): 970-980.
24- Liu Zhigang., and Xu Qinchao. 2018. Wetting patterns estimation in cultivation substrates under drip irrigation. Desalination and Water Treatment 112: 319-324.
25- Malek K., and Peters R.T. 2011. Wetting pattern models for drip irrigation: new empirical model. Irrigation and Drainage Engineering 137: 530–536.
26- Mohammadbeigi A., Mirzaei F., and Ahraf N. 2017. Simulation of soil moisture distribution under drip irrigation pulsed and continuous in dimensional analysis method. Iranian Journal of Water and Soil Conservation 23(6): 163-180. (in Persian with English abstract)
27- Mostaghimi S., and Mitchell J.K. 1983. Pulsed trickling effect on soil moisture distribution. Journal of Water Resource Bulletin 19(4): 605–612.
28- Qiaosheng Sh., Zouxin L., Zhenying W., and Hayjung L. 2007. Simulation of the soil wetting shape under porous pipe sub-Irrigation using dimensional analysis. Irrigation and Drainage Engineering 125: 389- 398.
29- Samadianfard S., Sadraddini A.A., Nazemi A.H., Provenzano G., and Kisi O. 2012. Estimating soil wetting patterns for drip irrigation using genetic programming. Spanish Journal of Agricultural Research. 10: 1155–1166.
30- Schaap M.G., Leij F.J., and Van Genuchten M.T. 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. Hydrology. 251: 163–176.
31- Schwartzman M., and Zur B. 1986. Emitter Spacing and Geometry of Wetted Soil Volume. Irrigation and Drainage Engineering 112(3): 242-253.
32- Šejna M., Simunek J., and Van Genuchten M.T. 2014. The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media, Version 2.04 (PC Progress, Prague, Czech Republic).
33- Singh D.K., Rajput T.B.S., Sikarwar H., and Ahmad V.T. 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. Agricultural Water Management 83:130-134.
34- Subbaiah R. 2013. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. Irrigation Science 31: 225–258.

Journal of Water and Soil
Vol. 34, No. 2, May-June 2020, p. 349-364

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۴، شماره ۲، خرداد – تیر ۱۳۹۹، ص. ۳۶۴-۳۴۹

Simulation of Wetted Area of Moisture Bulb in Pulsed Drip Irrigation

B. Karimi[1*]- N. Karimi[2]
Received: 02-09-2019
Accepted: 09-02-2020

Introduction: Among irrigation methods, a drip irrigation system (surface and subsurface) is more acceptable in arid and semi-arid regions due to high water use efficiency and potential crop yield. Pulse drip irrigation (with suitable management practices) is one of the drip irrigation methods (includes a set of cycles, each cycle consisting of the irrigation phase and a resting phase) that have high potential to improve the uniformity of soil moisture distribution. Suitable design and management of pulse or/and continuous drip irrigation systems substantially require a proper understanding of the moisture distribution pattern around the emitter. One of the critical parameters concerning the moisture distribution pattern, taking into account the wetted area of emitter. Important parameters of the wetted area include the down wetted area (A_d) for the surface and subsurface drip irrigation system as well as the up wetted area of an emitter (A_{up}) for the subsurface drip irrigation. Modeling the wetted area pattern and considering this parameter in design as one of the criteria for increasing water efficiency in surface and subsurface drip irrigation systems is critical and important.

Materials and Methods: In this research, experiments were carried out in a transparent rectangular cube with dimensions of (3 * 1 * 0.5 m) using three different soil textures (fine, heavy, and medium). The drippers were installed at three different soil depths (surface, 15cm, and 30cm). The emitter discharge was considered 2.4, 4, and 6 lit/hr. Also, these experiments were carried out for two continuous and pulse irrigation systems. In pulse irrigation, the pulse cycles were considered 30-30, 20-40, and 40-20 min. The first number refers to the irrigation time, and the second number refers to the resting time of the system in each cycle. In this research, using a nonlinear regression model, empirical models were developed to predict the wetted area of the moisture front. The input parameters of the suggested model include emitter discharge, saturated hydraulic conductivity, application time, soil bulk density, emitter installation depth, initial soil moisture content, pulse ratio (the ratio of irrigation time to complete period of each cycle) and the proportions of sand, silt and clay in the soil.

Results and Discussion: The results of this study show that the highest and the lowest down wetted area (for surface and subsurface drip irrigation systems) are related to sandy and clay soils, respectively. Also, the highest up wetted area in the subsurface irrigation system is related to loamy and clay soils. The results of the comparison between measured and simulated values of down and up wetted area indicated that these models have acceptable precision and accuracy in estimating the wetted area of the wetting front in surface and subsurface drip irrigation (with pulsed and continuous application). The comparison between the measured and simulated down wetted area of the emitter (for surface drip irrigation with pulsed application) showed that the R^2, MAE and RMSE values varied between 0.98-0.99, 0.0027-0.0065 m^2 and 0.0034-0.0082 m^2, respectively. Concerning statistical values, it is evident that these models have excellent performance in estimation of down and up wetted area for subsurface drip irrigation. For subsurface drip irrigation with the pulsed application, the values of R^2, MAE and RMSE for the down wetted area of emitter, ranged 0.91-0.99, 0.002-0.0077 and 0.0032-0.0098, respectively. These models also estimate up wetted areas with less error, and the values of R^2, MAE, and RMSE for all treatments varied between 0.89-0.99, 0.0015-0.0067 $m^{2,}$ and 0.0019-0.0077 m^2, respectively.

Conclusion: This paper was aimed at presenting relationships for estimating the up and down wetted area of emitter for surface and subsurface drip irrigation (with pulsed and continuous application). Regarding the importance and applicability of empirical models, in this research, nonlinear regression models (NLR, which are more widely used among researchers) were applied. For NLR method, different ten input variables (i.e., emitter discharge, saturated hydraulic conductivity, application time, soil bulk density, emitter installation depth, initial soil moisture content, pulse ratio (the ratio of irrigation time to complete period of each cycle) and the percentage of sand, silt and clay) were considered. The results of this study indicate that the NLR model can

1 and 2- Assistant Professor and M.Sc. Student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: bakhtiar.karimi@gmail.com)
DOI: 10.22067/jsw.v34i2.82228

estimate the up and down wetted area, and the statistical indices values are within acceptable ranges. Considering these relations in designing surface and subsurface drip irrigation systems can improve the performance of these systems.

Keywords: Drip irrigation, Irrigation management, Moisture bulb, Simulation, Wetted area